

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ШЛАКОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КВАРЦСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук, **П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук
РИУП «НТП БНТУ «Политехник»
А.Д. РУЛЕНКОВ, **Г.В. ДОВНАР**, канд. техн. наук,
А.В. АРАБЕЙ, канд. техн. наук
Белорусский национальный технический университет

Исследованы структура и свойства шлаков, выделенных после металлургической переработки алюмоматричных кварцсодержащих композиций, полученных методом смешивания кварцевых песков с расплавом алюминия в жидко-твердофазном состоянии. Установлено, что фазовый состав полученной порошковой смеси на основе данных сканирующей лазерной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа включает, преимущественно, различные модификации оксида алюминия и металлический алюминий. Помимо алюмооксидных фаз и алюминия в составе смеси содержатся продукты взаимодействия компонентов сплава, флюса, кварцевого песка и атмосферных газов, такие как карбиды и нитриды алюминия, кристаллический кремний, сложные галогениды типа $CaAl_2F_4[(OH)_{4-x}F_x]$ и др.

Ключевые слова: шлак, система Al-SiO₂, алюмоматричные кварцсодержащие композиции, свойства, структура.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF SLAGS FORMED DURING METALLURGICAL PROCESSING OF ALUMINUM QUARTZ-CONTAINING COMPOSITIONS

I.V. RAFALSKI, Ph. D in Technical Sciences, **P.E. LUSHCHIK**, Ph. D
in Technical Sciences
Science and Technology Park of BNTU «Polytechnic»
A.D. RULENKOV, **G.V. DOVNAR**, Ph. D in Technical Sciences,
A.V. ARABEY, Ph. D in Technical Sciences
Belarusian National Technical University

The structure and properties of slags separated after metallurgical processing of aluminum quartz-containing compositions obtained by mixing quartz

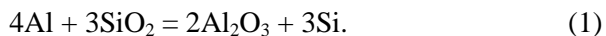
sands with aluminum melt in a liquid-solid state have been investigated. It was found that the phase composition of the obtained powder mixture based on the data of scanning laser spectroscopy and X-ray diffraction analysis mainly includes various modifications of aluminum oxide and metallic aluminum. In addition to alumina phases and aluminum, the mixture contains the products of interaction of alloy components, flux, quartz sand and atmospheric gases, such as aluminum carbides and nitrides, crystalline silicon, complex halides such as CaAl_2F_4 [(OH) 4-xFx], etc.

Keywords: slag, Al-SiO₂ system, alumina-matrix quartz-containing compositions, properties, structure.

В работе исследованы структура и свойства шлаков, выделенных после металлургической переработки алюмоматричных кварцосодержащих композиций, полученных методом смешивания кварцевых песков с расплавом алюминия в жидко-твердофазном состоянии [1, 2].

Для получения алюмоматричных кварцосодержащих композиций (рисунок 1) использовали формовочные кварцевые пески марок 1К₁O₂016, 1К₂O₂03, алюминиевый литейный сплав АК5М2 (ГОСТ 1583-93) в чушках (основа металлозавалки), отходы деформируемого алюминиевого сплава АМц (система алюминий-марганец, ГОСТ 4784-2019). Кварцевый песок вводился в количестве 15–20 % от массы металлозавалки в составе 60–70 % (мас.) сплава АК5М2 и 30–40 % (мас.) отходов сплава АМц.

В процессе температурно-временной обработки алюмоматричных кварцосодержащих композиций (рисунок 2) протекает химическая реакция взаимодействия алюминия и оксида кремния с образованием оксида алюминия, который впоследствии удаляется из расплава в шлак, и кремния, растворяющегося в расплаве алюминия:



Полнота протекания реакции взаимодействия (1) формовочных кварцевых песков с алюминием в процессе плавки контролировалась путем определения содержания кремния, выделившегося сверх его исходной концентрации (2,4–3,6 % мас.) в расплаве алюминия.



Рисунок 1 – Внешний вид алюмоматричных кварцсодержащих композиций



a



б

Рисунок 2 – Внешний вид шлаковой фазы в процессе ее отбора из металлургической печи (*a*) и слитков сплавов на основе алюминия (*б*) с содержанием кремния 8–11 % (мас.), полученных после металлургической переработки алюмоматричных кварцсодержащих композиций на основе системы Al/SiO₂

Химический состав алюминиевых сплавов АК5М2 и АМц, использованных для синтезирования порошковых алюмооксидных материалов, представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав алюминиевых сплавов АК5М2 и АМц, использованных для синтезирования порошковых алюмооксидных материалов (в соответствии с ГОСТ 1583-93 и 4784-2019)

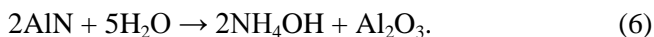
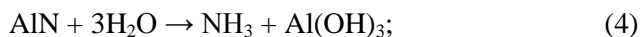
Сплав	Содержание элементов, % мас.								
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al	Прочие элементы
АК5М2	4–6	≤1,0	1,5–3,5	0,2–0,8	0,2–0,85	≤1,5	0,05–0,2	ост.	учитываемые примеси до 3,0
АМц	≤0,6	≤0,7	≤0,2	1,0–1,5	≤0,2	≤0,1	≤0,1	ост.	≤0,15

Для удаления шлаковой фазы после металлургической переработки алюмоматричных кварцосодержащих композиций на основе системы Al/SiO₂ применяли рафинирующую обработку расплава флюсом (в количестве 1–2 % от массы металлозавалки) в составе солей: KCl (50 % мас.), NaCl (30 % мас.), Na₃AlF₆ (15 % мас.), CaF₂ (5 % мас.). Полученную шлаковую смесь собирали в стальную изложницу и после охлаждения просеивали на ситах (размеры ячейки от 1 до 3 мм) для удаления металло- и флюсосодержащих конгломератов (рисунок 3).

Для удаления (растворения) солей рафинирующего флюса шлаковую смесь подвергали гидрообработке: помещали в емкость с водой при температуре 20–50 °С, вымешивали в течение 3–5 мин., полученную водно-шлаковую суспензию отстаивали в течение 10–15 мин., затем водно-солевой раствор сливали. Весь цикл гидрообработки повторяли 2–3 раза, после чего подготовленную смесь просушивали при температуре 120–150 °С.

В процессе взаимодействия с водой карбидов и нитридов алюминия, содержащихся в шлаке, протекают химические реакции их гидролиза с образованием щелочного раствора:





a



б

Рисунок 3 – Внешний вид шлаковой смеси после металлургической переработки алюмоматричных кварцсодержащих композиций и рафинирующей обработки расплава (*a*) с крупными металло- и флюсосодержащими конгломератами (*б*)

Аммиак легко растворяется в воде, одновременно повышая его рН до 9 и выше при длительном выстаивании шлако-керамической водной суспензии. Высокая щелочность раствора легко обнаруживается стандартными методами химического анализа (рисунок 4), процесс выстаивания которого сопровождается резким характерным запахом выделяющегося газообразного аммиака NH_3 .



a



б

Рисунок 4 – Выделение газообразных продуктов гидролиза нитрида алюминия (*a*) и результаты pH-анализа щелочного раствора водной суспензии шлака (*б*)

Структура частиц порошкового материала, синтезированного и выделенного из шлаковой фазы в процессе металлургической обработки алюмоматричных композиций на основе системы Al/SiO_2 (рисунок 5), представлена на рисунке 6.

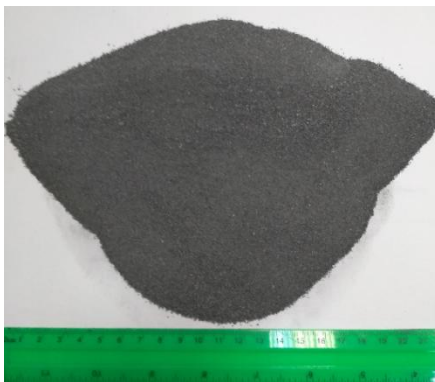
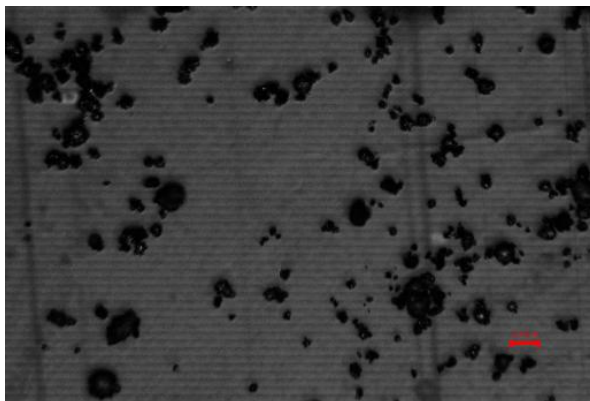
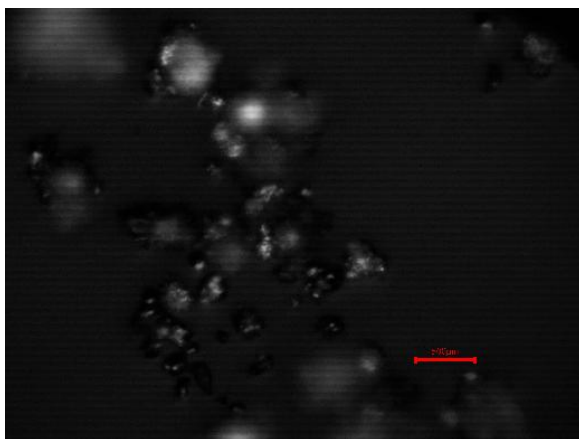


Рисунок 5 – Внешний вид шлаковой смеси после гидрообработки для удаления солей рафинирующего флюса и просушивания

Установлено, что частицы порошка имеют округлую, губчатую форму с размерами, близкими к исходным размерам частиц кварцевого песка, преимущественно, от 100 до 300 мкм, с нехарактерным для керамических соединений металлическим блеском поверхности (рисунок 6, *б*).



a



б

Рисунок 6 – Структура частиц порошкового материала, синтезированного и выделенного из шлаковой фазы в процессе металлургической обработки алюмоматричных композиций на основе системы Al/SiO₂: *a* – в естественном (неуплотненном) состоянии; *б* – микроизображение частиц в оптическом микроскопе

Химический состав порошковой смеси, синтезированной в процессе металлургической обработки алюмоматричных композиций на основе системы Al/SiO₂, по данным микрорентгеновского анализа представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Химический состав порошковой смеси, синтезированной в процессе металлургической обработки алюмоматричных композиций на основе системы Al/SiO₂ по данным микрорентгеновского анализа

Содержание химических элементов, мас. %											
Al	O	Si	N	F	Cl	Na	K	Ca	Mn	Fe	C
35,3– 38,9	33,5– 43,9	2,5– 18,1	3,2– 4,3	1,3– 2,4	2,3– 6,3	0,8– 2,8	1,2– 3,8	0,05– 0,3	≤ 0,7	≤ 0,3	ост.

Фазовый состав полученной порошковой смеси на основе данных сканирующей лазерной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа является достаточно сложным и включает преимущественно различные формы алюмооксидных фаз, в том числе кубической Al_{2,667}O₄, ромбоэдрической Al₂O₃ и моноклинной Al_{2,427}O_{3,64} модификаций оксида алюминия, а также металлический алюминий. Помимо алюмооксидных фаз и алюминия в составе порошкового материала содержатся различные продукты взаимодействия компонентов сплава, флюса, кварцевого песка и атмосферных газов, такие как карбиды и нитриды алюминия (Al₄C₃, AlN). В составе порошка также выявляются кристаллический кремний, сложные галогениды типа CaAl₂F₄[(OH)_{4-x}F_x] и др.

Гранулометрический состав полученной порошковой смеси, установленный на основе ситового метода анализа, показал следующее распределение частиц по фракциям: свыше 0,315 мм – 35,6 %; 0,2–0,315 мм – 43,7 %; 0,1–0,2 мм – 10,1 %; 0,063–0,1 мм – 1,4 %; менее 0,063 мм – 9,2 %. Насыпная плотность порошковой смеси составила 1,91–1,95 г/см³, в уплотненном состоянии (уплотнение встряхиванием) 2,17–2,21 г/см³, естественный угол откоса порошковой смеси составил 34°, сыпучесть 26,7–27,8 г/с (для сухого кварцевого песка 25,2–25,7 г/с).

Таким образом, в работе представлены результаты исследований структуры и свойств шлаков, выделенных после металлургической переработки алюмоматричных кварцсодержащих композиций, полученных методом смешивания кварцевых песков с расплавом алюминия в жидко-твердофазном состоянии.

Установлено, что фазовый состав полученной порошковой смеси на основе данных сканирующей лазерной спектроскопии и рентгеноструктурного анализа включает, преимущественно, различные

модификации оксида алюминия и металлический алюминий. Помимо алюмооксидных фаз и алюминия в составе смеси содержатся продукты взаимодействия компонентов сплава, флюса, кварцевого песка и атмосферных газов, такие как карбиды и нитриды алюминия, кристаллический кремний, сложные галогениды типа $\text{CaAl}_2\text{F}_4[(\text{OH})_{4-x}\text{F}_x]$ и др.

Список литературы

1. Рафальский, И.В. Физико-химические основы синтеза силицинов с использованием кварцсодержащих материалов / И.В. Рафальский, А.В. Арабей, Б.М. Немененок – Минск: БНТУ, 2015. – 140 с.

2. Рафальский, И.В. Ресурсосберегающий синтез сплавов на основе алюминия с использованием дисперсных неметаллических материалов и интеллектуальные методы контроля металлургических процессов их получения / И.В. Рафальский. – Минск: БНТУ, 2016. – 308 с.

References

1. Rafalski, I.V. *Fiziko-himicheskie osnovy sinteza siluminov s ispolzovaniem kvartscoderzhaschih materialov* [Physicochemical foundations of silumins synthesis using quartz-containing materials] / I.V. Rafalski, A.V. Arabey, B.M. Nemenenok. – Minsk: BNTU Publ., 2015. – 140 p.

2. Rafalski, I.V. *Resursosberegayuschiy sintez splavov na osnove aluminiya s ispolzovaniem dispersnyh nemetallicheskih materialov I intellektualnye metody kontrolya metallurgicheskikh protsessov ih poluchenia* [Resource-saving synthesis of aluminum-based alloys using dispersed non-metallic materials and intelligent control methods for metallurgical processes of their production] / I.V. Rafalski. – Minsk: BNTU Publ., 2016. – 308 p.

Поступила 06.10.2021

Received 06.10.2021